

複合加工機のミリング主軸の動的運動精度の測定法に関する研究

京都大学工学研究科 ○澤田 昌広, 茨木 創一, 松原 厚, 株式会社森精機製作所 榎原 圭蔵

要 旨

本研究では、複合加工機のミリング主軸回転軸の動的運動精度を測定するための方法を提案することを目的とする。従来マシニングセンタの精度検定に広く普及している DBB (Double Ball Bar) 測定装置を用いて、ミリング主軸の動的運動精度を、工具端において測定する方法を示した。ケーススタディとして、ウォームギア駆動及びダイレクトドライブモータ駆動のミリング軸回転軸を持つ複合加工機の運動精度測定に適用し、その比較を行った。

1. 緒言

近年、加工に要する時間とコストの削減、製造プロセスの加速、スリム化といった利点から、複合加工機の普及が進んでいる。工具の角度割り出しや同時多軸運動による輪郭加工の更なる高精度化のために、特に複合加工機特有の構造であるミリング主軸回転軸 (B 軸) の運動精度を検定する手法が求められている¹⁾。しかし、そのような測定法は十分に確立されておらず、規格も存在しないのが現状である。B 軸の回転位置決め精度の測定には、オートコリメータを用いることが多いが、回転軸上に反射鏡を設置することが構造上困難である場合がある。そして、回転軸上での位置決め誤差が、最終的に加工精度を決定する工具端での位置決め精度と限らない。また、オートコリメータを用いた測定では動的な運動精度の測定は困難である。

そこで本論文ではマシニングセンタの精度検定に広く普及している Double Ball Bar 測定装置 (以下 DBB 測定装置と略す) を用いて測定を行う。従来、DBB 測定装置は 3 軸工作機械を対象として用いられてきたが、近年になって多軸工作機械の運動精度に応用する研究がいくつか報告されている²⁾。

本論文では DBB 測定装置を用いることで、同時多軸運動時におけるミリング主軸回転軸 (B 軸) の動的な運動精度を、工具端において簡便に測定する方法を提案する。

2. 測定方法

2.1 同定対象とする誤差

本研究で対象とする複合加工機の構造を図 1 に示す。本研究では、図 2 に示すような X,Z 軸、及び B 軸による同期運動時における、XZ 平面上での工具端の位置決め誤差を考える。工具端における位置決め誤差は、B 軸回転円周方向の成分 Δr_t と、回転半径方向の成分 Δr_r に分けることができる。このうち、B 軸回転円周方向の成分 Δr_t は、B 軸回転角度の誤差 (ΔB) が主に影響を及ぼし、これが本測定の主な測定対象である。ただし、X,Z 軸との同期運動により位置決めするので、X,Z 軸の位置決め誤差 ($\Delta z, \Delta x$) の影響も重畳的に現れる。一方、B 軸回転半径方向の成分 Δr_r は、B 軸回転角度の誤差 (ΔB) の影響を受けず、X,Z 軸の位置決め誤差 ($\Delta z, \Delta x$) の影響のみが現れる。本研究では、工具端における位置決め誤差の B 軸回転半径方向の成分 Δr_r 、及び円周方向の成分 Δr_t の両者を測定する。

2.2 測定方法

測定は、図 3 に示すようにミリング主軸とワーク主軸間に DBB 測定装置を取り付け、B 軸回転と X 軸、Z 軸の円弧補間により行う。すなわち、B 軸回転運動の回転半径と X 軸、Z 軸の円弧半径および、回転速度と円弧補間の速度を一致させる。

B 軸回転半径方向誤差 Δr_r は、図 3(a) に示される測定 1 を用いて測定する。また B 軸回転円周方向誤差 Δr_t は、図 3(b),(c) に示される測定 2,3 を用いて同定することができる。

測定 2,3 に用いる回転半径 R_c は、測定 1 を行うことで決定する。まず測定 1 において、円弧運動誤差軌跡の中心が原点に一致するように測定 1 の回転半径 R_b を調整する。調整後、ミリング主軸鉛直状態 ($B = 0^\circ$) で、その状態時の DBB 測定装置のバーの長さを読み取る。そして、 R_b からバーの長さを差し引いた値を測定 2,3 で用いる回転半径 R_c とする。

測定 2 では DBB 測定装置のバーが X 方向を向いているため、B 軸回転円周方向誤差の X 方向成分 Δr_x のみが測定される。同様の原理で、測定 3 では Z 方向成分 Δr_z のみが測定される。B 軸回転角度 B における両測定でのバーの長さ変位 $\Delta r_x, \Delta r_z$ より、B 軸回転円周方向誤差 Δr_t は以下のように表される。

$$\Delta r_t = \Delta r_x \sin B + \Delta r_z \cos B \quad (1)$$

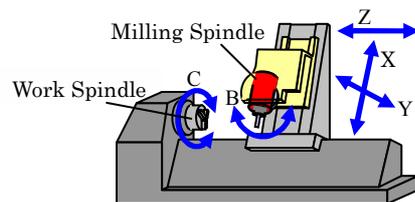


Figure 1: Integrated Machine Tool

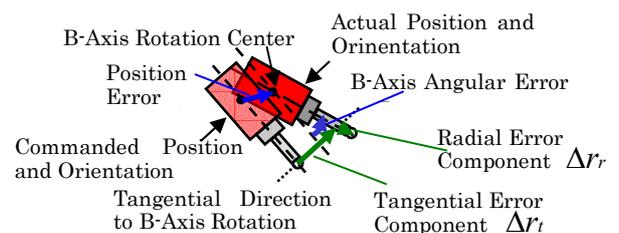


Figure 2: Positioning error components at tool tip

2.3 セットアップに起因する誤差

同定対象である X 軸, Z 軸, B 軸の運動精度以外にも, 測定 2,3 に影響を与える誤差要因が存在する. 一つはミリング主軸側球のずれであり, もう一つは半径誤差である.

ミリング主軸側球のずれとは, DBB 測定装置のミリング主軸側の球と B 軸回転運動の中心が一致していないことを指す.

半径誤差とは, X, Z 軸の運動の回転半径 R_c と, B 軸回転運動の中心からミリング主軸側球の中心の間の実際の距離との誤差を指す. 半径誤差がある場合, ミリング主軸側球の中心と実際の回転中心にずれが生じる.

本論文では, これらの誤差を総じてセットアップに起因する誤差と呼ぶ. 実際の測定では, 測定結果からセットアップに伴う誤差の影響を補正し, その後式(1)を用いて B 軸回転円周方向誤差 Δr_t を同定する.

3. ケーススタディ

異なる構造を持つ 2 機の複合加工機を用いて, 実際に測定を行った. なお, 本研究で対象とした複合加工機は, B 軸の駆動系にウォームギアを用いた構造の機械 A, ディレクトドライブモータを用いた構造の機械 B である. 測定は一定送り速度(500mm/min)で CW, CCW 方向の順に行った. なお, B 軸回転角度はミリング主軸鉛直状態で $B = 0^\circ$, ミリング主軸水平状態で $B = 90^\circ$ である. 機械 A の測定結果を図 4 に, 機械 B の測定結果を図 5 に示す.

図 4 より, 機械 A では B 軸回転半径方向誤差 Δr_r と比較して, 円周方向誤差 Δr_t には大きな誤差が観察できるが, これは B 軸の運動誤差の影響が大きく現れているためである. 特に, 3.3° 毎の周期的誤差成分が観測できるが, これは B 軸を駆動するウォームギアの歯幅に対応した振動である. また 3.3° 毎よりも高周波の周期的誤差成分も見られる. この振動成分は振幅が約 $6\mu\text{m}$ である. 機械 A の B 軸の位置決め分解能は 0.001° であり, 工具端における円周方向への変位に換算すると約 $6.6\mu\text{m}$ である. したがって, この高周波の周期的誤差成分はフィードバック制御に起因するものと推測できる.

図 4 と図 5 を比較し, 駆動系にディレクトドライブモータを用いた機械 B では, ウォームギア駆動の機械 A に見られたウォームギアによる振動成分は当然見られない. より高周波数の振動成分についても, 振幅が約 $0.5\mu\text{m}$ と機械 B に比べて約 12 分の 1 と非常に小さくなっている. これは機械 B の CNC 制御システムの位置決め分解能が 0.0001° と, 機械 A の 10 分の 1 であり, フィードバック制御に起因する振動が低減したためと考えられる.

4. 結言

本研究では, 同時多軸運動時におけるミリング主軸回転軸 (B 軸) の動的な運動精度を, 工具端における運動誤差として測定する方法を提案し, 異なる構造を持つ 2 機の複合加工機を用いて実際に測定を行った.

参考文献

- 1) 村木俊之: 複合工作機械の機能開発と性能向上に関する要求(2003)
- 2) 例えば, 坂本重彦, 稲崎一郎, 塚本顕彦, 市来崎哲雄:

ボールバーによる五軸マシニングセンタの組立誤差同定法, 日本機械学会論文集(C編)63, 605(1997-1), 262

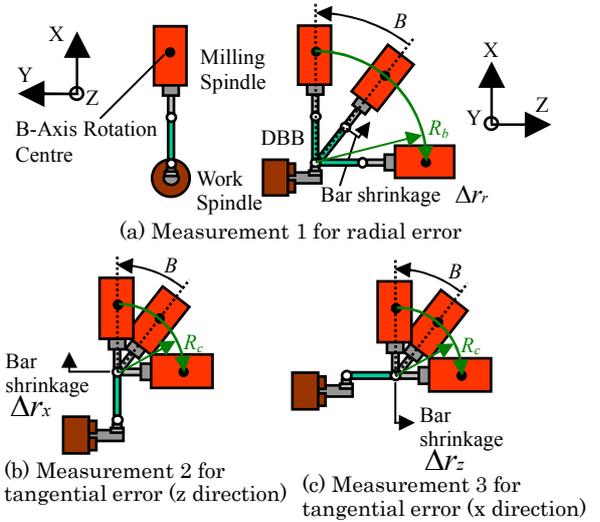


Figure 3: DBB measurement setups

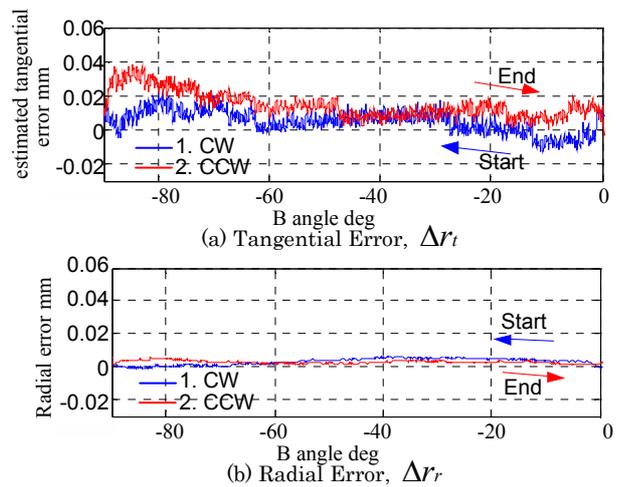


Figure 4: Estimated motion error at tool tip on the worm-gear driven machine

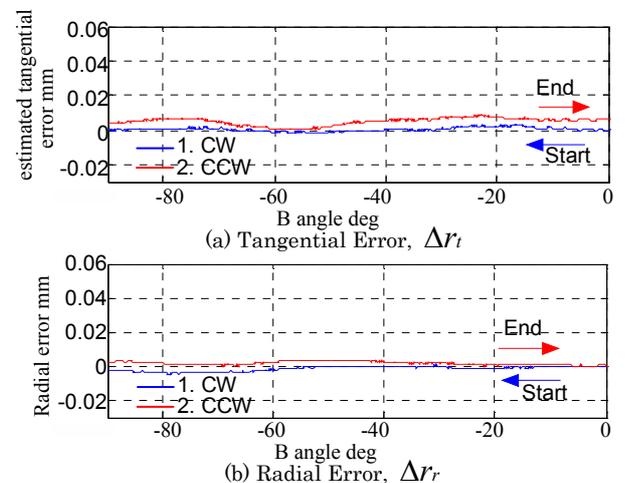


Figure 5: Estimated motion error at tool tip on the DirectDrive motor driven machine